

---

# Production de vapeur à partir de l'eau traitée par le procédé d'osmose inverse

Henry Lérat, Urs Richli Dr ès sciences, Burkhalter & Partner SA

L'osmose inverse est une technique de traitement d'eau idéale pour la production de vapeur. Par rapport aux solutions traditionnelles l'osmose inverse a de multiples avantages, notamment la réduction de la consommation d'énergie calorifique et des coûts d'exploitation. L'obtention de fortes possibilités de concentration en chaudière conduisant à de faibles taux de purge, la production de vapeur « blanche » dépourvue de composés volatils toxiques et l'élimination des risques de primage sont d'autres points importants.

---

L'eau utilisée pour la production de vapeur peut provoquer dans les générateurs et dans les conduits de vapeur tout un ensemble d'inconvénients qui iront du simple entartrage par les carbonates, aux problèmes de corrosion des éléments du réseau de distribution, en passant par des destructions métalliques liées à l'acide carbonique aux points de condensation, des formations de tartres sulfatés ou siliceux (très difficiles à retirer) et des phénomènes de primage avec « lessivage » des conduits de vapeur par l'eau de chaudière en général fortement minéralisée.

## Procédé classique utilisant les résines échangeuses d'ions.

Il existe des techniques classiques pour prévenir une grande partie de ces perturbations, qui iront du simple adoucissement pour empêcher les « tartres carbonatés » à la déminéralisation sur résines échangeuses d'ions pour les générateurs ayant des pressions de travail  $\geq 12$  bar (Fig.1).

Des produits dits de conditionnement sont ajoutés à l'eau d'alimentation des chaudières en association avec le ou les traitements en amont pour éviter les formations de dépôts dans le générateur de vapeur, pour réduire l'agressivité de la vapeur, pour combattre les risques de corrosion dans le générateur et les réseaux de vapeur, enfin pour éviter les accidents dus au « primage » en chaudière.

## Traitement incomplet résultant d'un simple adoucissement pour les générateurs de vapeur travaillant à basse et moyenne pression.

L'adoucissement en général réservé aux petits générateurs travaillant avec une pression moyenne ne pose pas de problèmes de rejets polluants et de risques occasionnés par la manipulation de réactifs dangereux puisqu'utilisant du sel (ou chlorure de sodium).

L'adoucissement ne provoque pas de changement de la minéralisation globale. Ce traitement ne fait que remplacer le calcium et le magnésium de l'eau (responsables des tartres carbonatés) par des ions sodium. La minéralisation de l'eau demeurera inchangée, et souvent elle limitera les possibilités de concentration en chaudière et provoquera des purges de déconcentration importantes avec perte d'eau, perte de calories, et pertes de produits de conditionnement.

Il en sera tout autrement lorsque l'opérateur désirera débarrasser l'eau de ses bicarbonates (décarbonatation) ou de ses sels dissous (déminéralisation).

## Inconvénients majeurs dus aux traitements de décarbonatation et de déminéralisation sur résines échangeuses d'ions.

Ces techniques utilisent des réactifs dangereux, toxiques et très polluants

Il faut en effet pour ces opérations

de traitement de l'eau (destinées à augmenter les taux de concentration dans les chaudières et à éviter des formations de tartres siliceux, sulfatés, etc.) mettre en oeuvre des réactifs tels que l'acide chlorhydrique ou sulfurique pour la décarbonatation ou pour ôter les cations en première partie de déminéralisation avec des résines dites respectivement : carboxyliques et cationiques fortes.

A ces acides s'ajoute la soude (en général en solution concentrée) pour parachever la déminéralisation en enlevant les anions sur des résines échangeuses d'ions régénérées en milieu alcalin.

En plus des problèmes posés par ces réactifs très dangereux tant pour les manipulateurs que pour les matériels placés à proximité, sans compter les vapeurs corrosives et toxiques émises par certains acides (chlorhydrique en particulier) il faut prendre en compte les rejets toxiques, très polluants, et onéreux étant donnés que les « agences de bassin » taxent fortement ces eaux résiduelles provenant d'installation obligatoirement déclarées (et qui parfois ne seront plus autorisées suivant la destination de la zone où ils se situeront).

Avec les matériels à mettre en oeuvre pour déminéraliser les eaux (colonnes d'échanges d'ions, bacs à réactifs, etc.) il faut prévoir une installation complémentaire dite de neutralisation des effluents (eaux de régénérations) qui sortent des appareils dotés de résines, avec un caractère extrêmement acide ou alcalin.

## Consommation de réactifs chimiques.

Le rendement des résines échangeuses d'ions lors de leur régénération (opération consistant quand leur aptitude à déminéraliser l'eau est épuisée, à leur enlever les ions des eaux traitées qui les saturent, et à leur conférer un nouveau pouvoir de traitement) est très loin des 100%. Il faut en général utiliser des quantités d'acide et de soude représentant 110 - 150 - 200% voir plus des quantités utiles pour éliminer les éléments correspondants de minéralisation. Ces excédents malheureusement nécessaires de réactifs acides et alcalins viennent en-

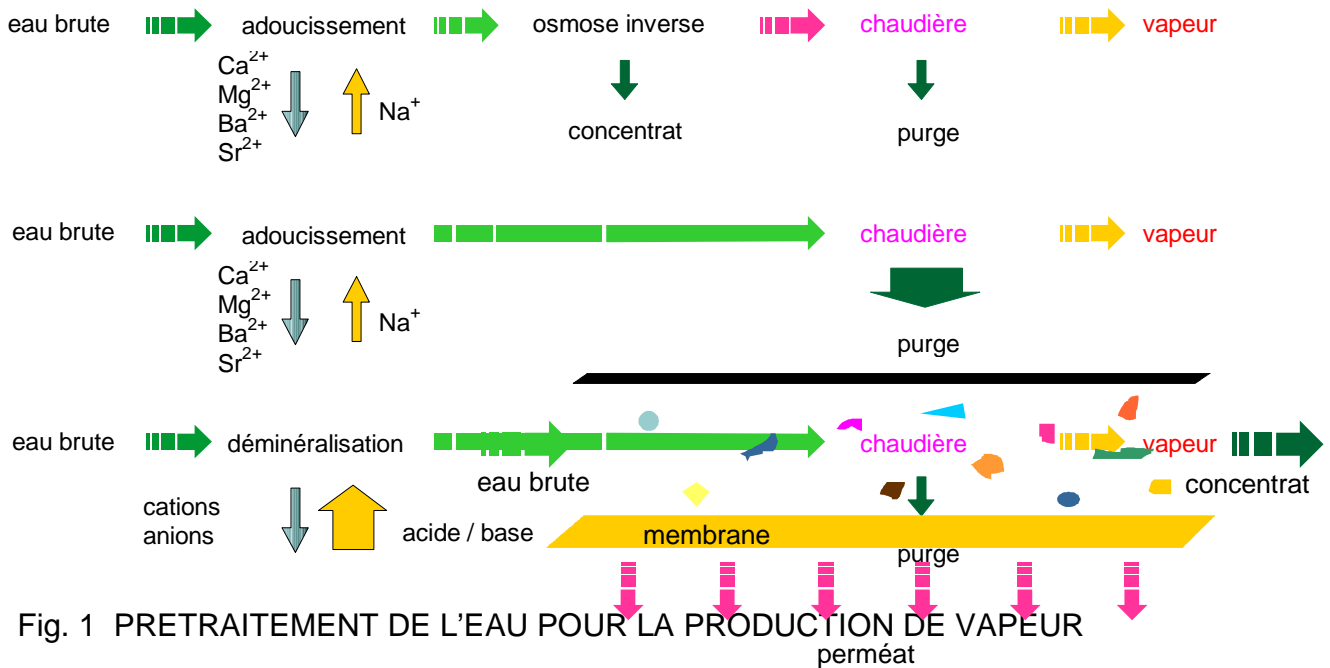


Fig. 1 PRETRAITEMENT DE L'EAU POUR LA PRODUCTION DE VAPEUR perméat

core augmenter la charge polluante et en plus confèrent aux eaux à rejeter des pH (caractère acide ou alcalin) hors normes et dangereux pour l'environnement, les personnes travaillant à proximité et les conduits d'évacuation si ceux-ci ne sont pas en matériaux spéciaux antiacide et anti-alcalins.

### Performances limitées des techniques de déminéralisation sur résines.

Il y a d'autre part dans les eaux des éléments dit colloïdaux (éléments existant selon un état semi-dissous) qui échappent totalement aux résines et qui peuvent en plus de les empoisonner, provoquer des perturbations dans les générateurs de vapeur en occasionnant des primages, ou en libérant par hydrolyse des acides organiques qui formeront des mousses en réagissant avec des composés organiques.

Les micropolluants qui eux aussi sont présents dans beaucoup d'eaux de distribution échappent à l'action des résines et en se décomposant en chaudière sous l'effet de la vapeur ils passeront pour partie avec celle-ci en la polluant.

Les échangeurs d'ions représentent un siège du développement de bactéries. Les matières organiques se fixent sur les résines échangeuses d'ions servant ainsi d'éléments nutri-

Fig. 2 OSMOSE INVERSE, UNE FILTRATION 'CROSS-FLOW'

tifs aux bactéries qui existent dans toutes les eaux de distribution. Il s'agit normalement de bactéries non pathogènes (non dangereuses pour l'homme) qui vont proliférer et passer de quelques centaines à plusieurs millions (suivant la fréquence de régénération des résines). Les conduits, les vannes, les clapets, les résines vont progressivement être enrobés par ces développements. Pour les échangeurs d'ions ce phénomène se traduira par des réductions importantes de pouvoir d'échange et des réductions de cycle. Si ces derniers ne sont pas suivis régulièrement, dans les installations préréglées pour se régénérer après un certain volume d'eau passé sur les résines, il y aura des risques certains d'envoi d'eau non traitée vers les appareils devant utiliser de l'eau déminéralisée.

Un procédé de traitement par adoucissement peut être mis à l'abri de ces inconvénients en préchlorant très légèrement l'eau à traiter. C'est rarement le cas pour la production d'eau déminéralisée qui sera alors très polluée par des bactéries mêmes banales et ceci peut être catastrophique pour la production de vapeur car les produits de leur décomposition en chaudière, quand la pollution bactériologique est devenue importante, provoquent souvent des primages très gênants et des

libérations d'éléments de minéralisation dans les eaux de chaudière et une contamination de la vapeur avec le passage de composés volatils provenant du métabolisme des bactéries.

Enfin, il faut savoir que les résines anioniques utilisées sous forme très alcaline en déminéralisation de l'eau libèrent en permanence et quel que soit leur ancienneté, des amines et des phthalates toxiques. Ces produits « passeront » eux aussi avec la vapeur qui perdra toute qualité pour demeurer une vapeur « blanche » ou une vapeur alimentaire, ou encore une vapeur stérile.

### Procédé d'épuration de l'eau par osmose inverse.

L'osmose inverse est un procédé de traitement des eaux mettant en oeuvre des membranes semi-perméables c'est à dire très perméables à l'eau pure et pratiquement imperméables aux éléments de minéralisation.

L'eau à épurer est admise sous pression au contact immédiat des membranes, l'eau pure diffuse dans l'épaisseur de la membrane semi-perméable, et les impuretés minérales, organiques, bactériennes, etc. sont évacuées à l'extérieur sous

forme d'un rejet qui représente en moyenne le ¼ du volume d'eau épurée produit (Fig.2).

De plus ces membranes en matériau plastique très résistant, ne libérant aucun composé chimique résultant de leur structure (pour les membranes ayant reçu un agrément d'organismes tels que le Ministère Français de la Santé, et de l'Association Américaine pour l'Alimentation et la Pharmacie: U.S. Food and Drug Association) ne sont dotées d'aucune porosité. Elles seront de ce fait, sauf accident ou mauvaise conception de montage de ces membranes, une barrière quasiment infranchissable par les microparticules, les substances colloïdales, les bactéries, les virus, les composés organiques de masse molaire égale ou supérieure à 250 daltons, etc.

Ces structures semi-perméables sont dotées d'une qualité supplémentaire appelée « pouvoir de coupure » qui leur confère la propriété d'éliminer plus de 99% de la plus part des substances toxiques appelées aussi micropolluants qui sont dues à la présence de composés organiques comme les pesticides, les herbicides, les fongicides, les biocides, les détergents durs, les composés phénolés, etc.

Nous voyons de suite que ce procédé réalise en une seule opération de multiples épurations à la fois microphysique, chimique, organique et bactériologique.

### **Importance capitale de la connaissance de l'eau pour les sociétés mettant en oeuvre les techniques d'osmose inverse.**

Pour travailler efficacement, de telles membranes doivent être alimentées avec une eau dite prétraitée c'est à dire adaptée par des moyens simples à ce mode d'épuration. Leur fiabilité dépend de ce prétraitement, lequel bien que simple n'est valable que si il est conçu par des spécialistes du traitement de l'eau. Le système le plus classique et le plus simple de mise en oeuvre de l'osmose inverse consiste dans son association à un adoucissement pour le prétraitement (afin de prévenir le risque de formation de dépôts carbonatés sur les mem-

branes accompagné d'une filtration de sécurité définie en fonction des caractéristiques physiques de l'eau à traiter.

### **Les membranes modernes permettent avec un seul appareil d'osmose d'éliminer 98 à 99% de la minéralisation de l'eau à épurer.**

Pour des utilisations en Génie Médical, dans l'industrie Pharmaceutique, pour certaines applications dans l'industrie Agro-alimentaire et dans les activités concernant l'industrie Electronique, l'eau déjà épurée par un appareil d'osmose peut être retraitée par un second appareil pour obtenir une eau très épurée ne contenant plus que des micro-traces de minéralisation. Avec ce mode d'exploitation, le seul réactif mis en oeuvre est du sel (chlorure de sodium) non toxique, non dangereux tant pour la manipulation que pour le stockage.

### **Osmose inverse et la production de vapeur.**

Compte tenu des opérations multiples d'épuration que réalise ce procédé en une seule opération, présente des avantages inestimables pour les exploitants de chaufferies et les installations de production de vapeur.

### **Possibilité de travailler avec de forts taux de concentration en chaudière accompagnée d'importantes économies.**

Suivant le type de générateur de vapeur, la minéralisation de l'eau de chaudière est limitée à des teneurs bien précises. Dans le Tab. 1 quelques valeurs typiques sont présentés.

Les facteurs de concentration sont calculés sur la base d'une eau de minéralisation très courante de l'ordre de 0,5 g/l.

### **Notion de purge de déconcentration.**

La purge de déconcentration (rejet à l'égout d'eau, de calories, de produits de conditionnement) est fonction de la vapeur perdue produite par la chaudière et du taux de concentration « C ».

La formule pour calculer les purges (t/h) est :

$$P = V_p / (C-1) \quad (1)$$

$V_p$  vapeur perdue en tonne/heure  
C facteur de concentration

### **Exemple chiffré**

Choisissons un générateur de vapeur travaillant à 12 - 15 bar avec pour eau d'alimentation une eau adoucie contenant 0,5 g/l de minéralisation moyenne, sans teneur excessive en chlorures, bicarbonates, sulfates, et silice. La température de l'eau de chaudière est à 12 bar de 188°C. La production de vapeur perdue est de 8 t/h. Le facteur de concentration moyen est de 4 (2g / 0.5g).

En utilisant la formule (1) ci dessus, la perte en eau de purge par heure sera:

$$8 / (4 - 1) = 2,667 \text{ m}^3/\text{h}.$$

Si l'eau a été traitée par un appareil d'osmose inverse éliminant au minimum 98% de la minéralisation globale, sa teneur résiduelle en sels dissous, y inclus la silice, sera de 10 mg/l soit 50 fois moins.

Le facteur théorique de concentration sera de  $2g / 0.01g = 200$ . Sur le plan pratique, pour maintenir des teneurs acceptables en TAC et en TA, il se limitera à 25 - 30.

Même en prenant le facteur de concentration de 25 la perte en eau de purge ne sera plus que de :

$$8 / (25 - 1) = 0.333 \text{ m}^3/\text{h}$$

soit 8 fois moins, ce qui correspond à une économie en eau de chaudière à 188°C considérable.

Valeurs limites de l'eau de chaudière (0.5 g/l)		
pression de fonctionnement bar	minéralisation max. g/l	taux de concentration
5 - 6	3 - 4	6 - 8
7 - 12	2.2	4 - 4.4
15 - 20	2	4
25 - 45	1	2
> 45	0.2- 0.5	

**Tab.1**

Pour comparer les coûts des deux procédés il faut garder à l'esprit les points suivants:

- par rapport à un adoucissement le prétraitement pour l'osmose inverse est un peu plus cher.
- avec un rendement hydraulique de 75% l'osmose inverse crée un rejet qui est 1/3 de la quantité de l'eau produite ce qui augmente légèrement la consommation de l'eau brute.
- ce surplus d'eau consommée doit aussi être prétraité
- l'osmose inverse utilise des pompes haute pression qui créent des coûts supplémentaires
- l'adoucissement comme prétraitement nécessite des purges plus importantes ce qui correspond à une grande perte en énergie de chaleur.

A raison de 8 heures de travail par jour et 5 jours par semaines, sur un an avec 46 semaines d'activité, l'économie en eau sera de :

$$(2.667 - 0.333) \cdot 8 \cdot 5 \cdot 46 = \mathbf{4'294 \text{ m}^3/\text{an.}}$$

Au seul plan du coût de l'eau pris à Fr. 3.50 le m<sup>3</sup>, l'économie sera de près de **Fr. 15'029.-** .

L'eau de purge à 12 bar contient 795 kJ/kg ou 795'490 kJ/m<sup>3</sup> de purge.

Le fuel oil domestique libère 41'868 kJ/kg. 4'292 m<sup>3</sup> de purge économisés représentent donc

$$795'000 \cdot 4'292 = \mathbf{3'415'834'060 \text{ kJ}}$$

Cela représente une économie de

$$3'415'834'060 / 41'868 = 81'586 \text{ kg}$$

ou

**81,6 tonnes de fuel.**

A environ Fr. 0.40 le kg (il s'agit d'une approximation) pour des produits à usage industriel, ceci représente une économie calorifique de

$$0.4 \cdot 81'586 = \mathbf{\text{Fr. } 32'634.-}$$

L'économie totale théorique sera sans compter l'économie en produits de conditionnement de

$$15'029.- + 32'634.- = \mathbf{\text{Fr. } 47'663.-}$$

L'économie réelle sera l'économie totale théorique calculée ci-dessus, diminuée du montant des dépenses supplémentaires en eau et en énergie occasionnées par le traitement de l'eau sur membranes d'osmose.

Les besoins annuels en eau traitée par osmose pour alimenter la chaudière produisant 8 t/h de vapeur perdue, 8 heures par jour, 5 jours par semaine, et 46 semaines par an seront :

$$(8 \text{ m}^3 \text{ « vapeur »} + 0.33 \text{ m}^3 \text{ « purge »}) \cdot 8 \cdot 5 \cdot 46 =$$

$$\mathbf{15'333 \text{ m}^3 / \text{an.}}$$

L'osmoseur ayant un rendement de 75% il y a un quart du volume d'eau osmosée produit qui est perdu sous forme de rejet. Ce volume de rejet sera de **5'111 m<sup>3</sup> /an.**

La consommation annuelle en eau prétraitée sera de

$$15'333 \text{ m}^3 + 5'111 \text{ m}^3 = \mathbf{20'444 \text{ m}^3 .}$$

Il y aura ici trois dépenses supplémentaires

1. Par rapport à l'eau simplement adoucie, l'eau prétraitée pour l'osmose coûte Fr. 0.25 de plus par m<sup>3</sup> . Comme il en sera consommé 20'444 m<sup>3</sup> le surcoût est de

$$20'444 \text{ m}^3 \cdot 0.25 \text{ Fr./m}^3 = \mathbf{\text{Fr. } 5'111.-}$$

A cause du rendement de l'osmoseur qui est de 75% il y a 5'111 m<sup>3</sup> /an d'eau prétraitée qui seront perdus sous forme de rejet. Cette eau prétraitée coûtant Fr. 3.50 le m<sup>3</sup> , le supplément de dépense dû à l'eau perdue sera de

$$5'111 \text{ m}^3 \cdot \text{Fr. } 3.50 = \mathbf{\text{Fr. } 17'888.-}$$

2. Le surplus de consommation d'eau totale est de 818 m<sup>3</sup>. Les coûts additionnels s'élèvent à

$$818 \text{ m}^3 \cdot 0.50 \text{ Fr./m}^3 = \mathbf{\text{Fr. } 409.-}$$

Pour un osmoseur travaillant à 15 - 20 bar il faut en moyenne pour des débits de 6 - 8 m<sup>3</sup> /h environ 1.35 kW·h d'énergie par m<sup>3</sup> d'eau osmosée.

*Remarque :*

Nous réalisons souvent, grâce à de toutes nouvelles membranes, des appareils d'osmose dont la consommation d'énergie est proche du kW·h/m<sup>3</sup> d'eau osmosée produit, mais nous avons préféré prendre une valeur correspondant à

l'énergie consommée par une grande majorité d'installations.

La consommation annuelle d'énergie électrique est de

$$20'444 \text{ m}^3 \cdot 1.35 \text{ kWh/m}^3 =$$

**27'599 kWh**

En prenant le kWh au prix moyen de Fr. 0.15, la dépense annuelle sera :

$$27'599 \text{ kWh} \cdot 0.15 \text{ Fr./kWh}$$

**= Fr. 4'140.-**

Tous ces calculs nous amènent à l'évaluation des économies effectives liées au traitement de l'eau par osmose inverse :

Economies total de l'osmose inverse:

Fr. 47'663.-

Dépenses additionnelles de l'osmose inverse:

Fr. 27'548.-

**Economies effectifs:**

**Fr. 20'115.-**

#### Remarque :

Quand la chaudière est alimentée en eau uniquement adoucie, la consommation d'eau sous forme de purge est d'à peu près 4'300 m<sup>3</sup> supplémentaires par an, vis-à-vis de l'eau osmosée. Ces m<sup>3</sup> supplémentaires d'eau adoucie entraînent la consommation d'un certain nombre de m<sup>3</sup> d'eau de régénération eux aussi supplémentaires du fait que les adoucisseurs fourniront plus d'eau adoucie.

Suivant la dureté de l'eau, ces m<sup>3</sup> supplémentaires utilisées pour un plus grand nombre de régénérations peuvent facilement représenter 150 à 200 m<sup>3</sup> /an qu'en principe il faudrait déduire de la consommation eau de rejet de l'osmose pour avoir un calcul plus exact. Ici nous ne les prendrons pas en compte.

Ces économies devront être réduites du montant annuel

des consommables incluant « l'usure » des membranes, des moteurs de pompe, des corps de

pompe eux-mêmes, et des frais annexes relatifs à la filtration avant osmose et dépendants des caractéristiques physique de l'eau à traiter (le coût du sel pour les adoucisseurs est inclus dans le prix de l'eau adoucie).

L'économie de fonctionnement sera donc de l'ordre de Fr. 20'000.- à laquelle il faudra ôter le montant des amortissements du matériel (hors consommables). Ces déductions supplémentaires dépendent du système d'amortissement utilisé par l'entreprise.

## Conclusion

L'osmose inverse est une méthode simple, peu polluante et plus économique par rapport aux traitements conventionnels avec l'utilisation de résines et des quantités considérables d'acide et de base.

Pour le choix des installations nouvelles les caractéristiques de fonctionnement et de l'exploitation par rapport à l'environnement deviennent de plus en plus déterminantes.

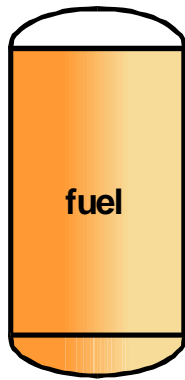
A la différence du traitement sur résines échangeuses d'ions en déminéralisation qui laisse passer intégralement les polluants organiques, les bactéries, les colloïdes, les détergents, les phénols non ionisés, et qui en plus libère dans l'eau des amines toxiques et des phthalates, le procédé d'épuration de l'eau par osmose inverse assure en plus de sa déminéralisation une épuration organique, micro-particulaire, bactériologique, virale, etc.

Mis à part le système d'adoucissement et le procédé de décarbonatation (qui n'assure qu'une déminéralisation partielle) l'osmose est le seul procédé de déminéralisation qui permet en aval de produire une vapeur stérile telle que l'entendent les pharmaciens, les responsables de production de produits alimentaires, les ingénieurs spécialisés dans la régulation hygrométrique stérile pour les salles d'opération et de réanimation.

Les produits organiques volatils de masse molaire 250 et plus ont été éliminés par l'osmose ainsi que les bactéries, les virus.

Même si il y a des entraînements vésiculaires (faible primage) d'eau de chaudière avec la vapeur produite, il n'y a dans l'eau aucune bactérie thermorésistante, ni germe sporulé ni substance colloïdale ni détergent lourd (non. biodégradable) comme cela peut exister si l'eau avant d'être admise en chaudière est simplement déminéralisée sur résines.

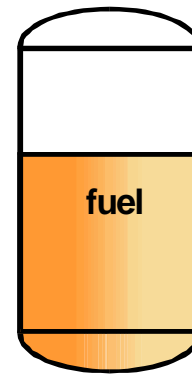
## Adoucissement



372'913 kg

Consommation en eau  
19'627 m<sup>3</sup> /Jahr  
le tout chauffé à 188 °C

## Adoucissement + osmose



291'327 kg

Consommation en eau  
20'444 m<sup>3</sup> /Jahr  
seulement 15'333 m<sup>3</sup> chauffés à 188 °C

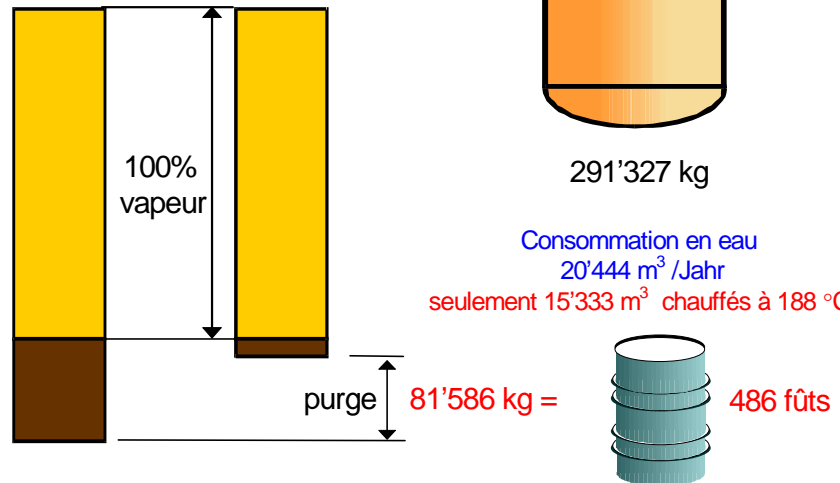


FIG. 3 COMPARAISON DES PRETRAITEMENTS

Les membranes semi-perméables d'osmose inverse éliminent les micro-particules solides qui peuvent créer en surface du plan d'eau en chaudière des zones de surchauffe très localisées occasionnant une très forte ébullition cause du primage.

De même, si il demeure dans l'eau des traces de détergents, des matières organiques, des bactéries,

des composés organo-métalliques non ionisés et échappant à la déminéralisation sur résines, tout ou partie de ces éléments indésirables provoquera des mousses et du primage qui peuvent être responsables du départ de la quasi totalité de l'eau en chaudière avec la vapeur, et occasionner dans le générateur un « coup de feu » qui peut l'endommager fortement.

Les membranes d'osmose inverse

assurent l'élimination des éléments précités et protègent d'une part le générateur contre les risques d'entraînements vésiculaires (primage) et d'autre part empêchent que la vapeur soit polluée.

Toutes ces avantages font de l'osmose inverse la méthode de choix pour le traitement de l'eau pour la production de vapeur.



**burkhalter & partner ag/sa**  
wassertechnik - technique de l'eau

Engelgasse 83  
4020 Basel  
Tel 061 313 31 00  
Fax 061 313 66 19

Worblaufenstr. 155  
3048 Worblaufen  
Tel 031 921 29 11  
Fax 031 921 56 49

Ch. de l'Esparcette 5  
1023 Crissier  
Tel 021 636 02 54  
Fax 021 636 02 74

Seminarstrasse 69  
5430 Wettingen 1  
Tel 056 427 00 00  
Fax 056 427 00 10